

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第34卷 第10期 Vol.34 No.10 **2014**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 34 卷 第 10 期 2014 年 5 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 景观可持续性与景观可持续性科学..... 赵文武,房学宁 (2453)
- 生态系统服务付费的诊断框架及案例剖析 朱文博,王 阳,李双成 (2460)
- 湿地植物根表铁膜研究进展..... 刘春英,陈春丽,弓晓峰,等 (2470)
- 水生生态环境中捕食信息素的生态学效应..... 覃光球,卢豪良,唐振柱,等 (2481)
- 脊椎动物传播植物肉质果中的次生物质及其生态作用 潘 扬,罗 芳,鲁长虎 (2490)

个体与基础生态

- 中亚热带天然林土壤 CH_4 吸收速率对模拟 N 沉降的响应 陈朝琪,杨智杰,刘小飞,等 (2498)
- 塔里木盆地南缘早生芦苇生态特征与水盐因子关系..... 贡 璐,朱美玲,塔西甫拉提·特依拜,等 (2509)
- 黄刺玫叶片光合生理参数的土壤水分阈值响应及其生产力分级..... 张淑勇,夏江宝,张光灿,等 (2519)
- 亚热带杉木和米老排人工林土壤呼吸对凋落物去除和交换的响应..... 余再鹏,万晓华,胡振宏,等 (2529)
- 施钾提高蚜害诱导的小麦茉莉酸含量和叶片相关防御酶活性..... 王 伟,张月玲,苏建伟,等 (2539)
- 高浓度 O_3 及太阳辐射减弱对冬小麦 PS II 光合活性及光能耗散的影响 孙 健,郑有飞,吴荣军,等 (2548)
- 蜡样芽孢杆菌 B3-7 在大田小麦根部的定殖动态及其对小麦纹枯病的防治效果 黄秋斌,张 颖,刘凤英,等 (2559)
- 有限供水下冬小麦全程耗水特征定量研究..... 张兴娟,薛绪掌,郭文忠,等 (2567)
- 抗真菌转基因水稻生态适合度评价..... 李 伟,郭建夫,袁红旭,等 (2581)
- 花生叶片蛋白组对 UV-B 辐射增强的响应 杜照奎,李钧敏,钟章成,等 (2589)
- 南海南部悬浮颗粒物脂肪酸组成..... 刘华雪,柯常亮,李纯厚,等 (2599)
- 年龄、集群、生境及天气对鄱阳湖白鹤越冬期日间行为模式的影响..... 袁芳凯,李言阔,李凤山,等 (2608)
- [树]麻雀羽再生的能量预算和水代谢散热调节 杨志宏,吴庆明,杨 渺,等 (2617)
- 低剂量杀虫剂对星豹蛛捕食效应的影响及其机理 李 锐,李 娜,刘 佳,等 (2629)
- 空心莲子草叶甲对越冬保护的响应与控害效能..... 刘雨芳,王秀秀,李 菲,等 (2638)
- ### 种群、群落和生态系统
- 气候变化对鄱阳湖白鹤越冬种群数量变化的影响..... 李言阔,钱法文,单继红,等 (2645)
- 不同退耕年限下菜子湖湿地土壤磷素组分特征变化..... 刘文静,张平究,董国政,等 (2654)

查干湖湿地浮游植物与环境因子关系的多元分析	李然然,章光新,张 蕾 (2663)
闽江河口区淡水和半咸水潮汐沼泽湿地土壤产甲烷菌多样性.....	曾志华,杨民和,余晨兴,等 (2674)
环境及遗传背景对延河流域植物叶片和细根功能性状变异的影响.....	郑 颖,温仲明,宋 光,等 (2682)
衡阳紫色土丘陵坡地植被恢复阶段土壤特性的演变.....	杨 宁,邹冬生,杨满元,等 (2693)
海平面上升影响下广西钦州湾红树林脆弱性评价.....	李莎莎,孟宪伟,葛振鸣,等 (2702)
中国南方3种主要人工林生物量和生产力的动态变化.....	杜 虎,曾馥平,王克林,等 (2712)
杉木人工林土壤真菌遗传多样性.....	何苑擘,周国英,王圣洁,等 (2725)
科尔沁固定沙地植被特征对降雨变化的响应.....	张腊梅,刘新平,赵学勇,等 (2737)
黄土丘陵区退耕还林地刺槐人工林碳储量及分配规律.....	申家朋,张文辉 (2746)
景观、区域和全球生态	
南亚热带森林演替过程中小气候的改变及对气候变化的响应.....	刘效东,周国逸,陈修治,等 (2755)
黄淮海平原典型站点冬小麦生育阶段的干旱特征及气候趋势的影响.....	徐建文,居 辉,刘 勤,等 (2765)
资源与产业生态	
基于GIS的山西省矿产资源规划环境影响评价	刘 伟,杜培军,李永峰 (2775)
基于效益分摊的水电水足迹计算方法——以密云水库为例	赵丹丹,刘俊国,赵 旭 (2787)
学术信息与动态	
全球土地计划第二次开放科学大会(GLP 2 nd Open Science Meeting)会议述评	段宝玲,卜玉山 (2796)
期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 348 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 36 * 2014-05	



封面图说: 鄱阳湖越冬的白鹤群——白鹤为国家一级保护动物,世界上白鹤东部种群的迁徙路线是从俄罗斯西伯利亚的雅库特,向南迁飞 5100km 到中国长江下游的鄱阳湖越冬,其中途经俄罗斯的雅纳河、印迪吉尔卡河和科雷马河流域,进入中国后主要停歇地有扎龙、林甸、莫莫格以及双台河口、滦河口、黄河三角洲和升金湖等地。多年的监测表明,世界 90% 以上的白鹤种群都在鄱阳湖越冬。越冬初期和末期是白鹤补充能量的关键阶段,因此,研究鄱阳湖国家级自然保护区越冬白鹤种群数量和当地气候变化的相关性具有重要意义。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@ 163.com

DOI: 10.5846/stxb201304110685

刘春英, 陈春丽, 弓晓峰, 周文斌, 杨菊云. 湿地植物根表铁膜研究进展. 生态学报, 2014, 34(10): 2470-2480.

Liu C Y, Chen C L, Gong X F, Zhou W B, Yang J Y. Progress in research of iron plaque on root surface of wetland plants. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(10): 2470-2480.

湿地植物根表铁膜研究进展

刘春英^{1,2,3}, 陈春丽^{1,2}, 弓晓峰^{1,2,*}, 周文斌^{1,2}, 杨菊云^{1,2}

(1. 鄱阳湖环境与资源利用教育部重点实验室, 南昌 330047; 2. 南昌大学环境与化学工程学院, 南昌 330031;

3. 江西财经大学旅游与城市管理学院, 南昌 330032)

摘要: 为了适应渍水环境, 许多湿地植物都具有根系泌氧、形成铁膜的能力。因铁膜具有特殊的物理或化学结构, 可以通过吸附和共沉淀作用影响元素在土壤中的化学行为和生物有效性, 在植物吸收营养元素和重金属中起重要作用。综述了湿地植物根表铁膜的形成、影响因素以及根表铁膜对营养元素和重金属的生态环境效应, 从表征技术方面阐述了根表铁膜的作用机制。对今后的研究方向给出如下建议: (1) 扩大研究领域; (2) 铁膜形成的动态变化过程; (3) 铁膜对植物生理形态的影响; (4) 利用先进的表征技术以确定铁膜的作用机制。

关键词: 湿地植物; 铁膜; 生态效应; 表征技术

Progress in research of iron plaque on root surface of wetland plants

LIU Chunying^{1,2,3}, CHEN Chunli^{1,2}, GONG Xiaofeng^{1,2,*}, ZHOU Wenbin^{1,2}, YANG Juyun^{1,2}

1 Key Laboratory of Poyang Lake Environment and Resource Utilization of Ministry of Education; Nanchang University; Nanchang 330047, China

2 School of Environmental and Chemical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China

3 School of the Tourism and Urban Management, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang 330032, China

Abstract: Waterlogged soils are frequently anaerobic, with low partial pressure of oxygen. To acclimate to an anaerobic condition when submerged in water, wetland plants must allow aerenchyma to transfer oxygen from aerial parts to the rhizosphere, which is termed radial oxygen loss. Radial oxygen loss also causes the oxidation of ferrous iron to ferric iron and the precipitation of iron oxides or hydroxides on the root surface. This material is termed “iron plaque”. Iron plaque is a mixture of crystalline and amorphous iron oxide or hydroxide, and is mainly composed of ferric hydroxides, goethite and lepidocrocite. Given the high adsorption capacity of functional groups on iron oxides or hydroxides, iron plaque can influence the chemical behavior and bioavailability of heavy metals and nutrient elements in the rhizosphere. In recent years a number of studies have been conducted on the formation of iron plaque and uptake of heavy metals and nutrient elements in wetland plants. In this paper, progress in research on iron plaque was analyzed and summarized from four aspects, i.e., the formation of iron plaque and factors influencing its development, the nutritional effect of iron plaque on plants, the ecological and environmental effects of iron plaque on heavy metals, and techniques for characterization of iron plaque. The formation of iron plaque is controlled by a number of biotic and abiotic factors, such as Fe^{2+} concentration, the oxidizing capability of the root system, and plant species. Iron plaque is an enriched reservoir of plant nutrient elements, but some results indicate that this function is related to the amount of iron plaque. Many studies have been conducted on the relationship between iron plaque formation and uptake of heavy metals in wetland plants, but the results reported among the studies are inconsistent. Some studies have indicated that the formation of iron plaque acts as a physical “barrier” to uptake

基金项目: 国家自然科学基金项目(21067008); 国家自然科学基金项目(41261097)

收稿日期: 2013-04-11; **网络出版日期:** 2014-02-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xfgong@ncu.edu.cn

of heavy metals through immobilization and co-precipitation, whereas other studies have reported no difference in the presence or absence of iron plaque. Furthermore, iron plaque may promote the uptake of heavy metals. In addition, some results indicate that the inhibitory and promotive actions of iron plaque on uptake of heavy metals were related to the amount of iron plaque on the root surface. Thus our understanding of the control of iron plaque formation and the mechanism of action of iron plaque on heavy metals uptake remains incomplete at present. The following suggestions for future research are put forward: (1) expand the fields of research, such as lake wetlands; (2) consider the influence of environmental factors on dynamic changes in processes involving iron plaque; (3) pay close attention to the effect of iron plaque on the physiology and morphology of plants; and (4) use advanced characterization techniques to analyze the mechanism of action of iron plaque on heavy metals. For example, ion selective electrodes could be used to measure root oxygen release, and gas chromatography-mass spectrometry used for characterization and quantification of root exudates. In situ techniques should be employed to elucidate the mechanism of action of iron plaque on heavy metals. In particular, X-ray absorption fine structure technology has high potential for clarification of the molecular mechanism of action of iron plaque.

Key Words: wetland plants; iron plaque; ecological and environmental effects; characterization technique

目前许多天然湿地已成为工农业废水、生活污水的承泄区,我国湿地面临严重的污染威胁。湿地植物对污染物的消减机理是近年来湿地科学研究的热点,如何提高湿地植物对污染物的吸收,提高湿地系统净化废水的效率一直受到广泛关注。有研究表明,广泛存在于湿地植物根表的铁膜,因其具有较大的表面积并带有正负电荷基团,可以通过吸附和共沉淀等作用,影响养分和重金属元素在土壤中的化学行为和生物有效性,对湿地植物根系吸收养分和污染物起着重要的门户作用^[1-6]。研究表明,湿地植物消减污染物的能力与植物根表铁膜的形成有着密切的关系^[7-10]。因此,湿地植物根表铁膜的研究对污染物的消减及调控有着重要的生态环境意义。

国际上对于植物根表铁膜的研究始于 20 世纪 60 年代^[11-12],国内开始于 20 世纪 90 年代^[13-14]。在湿地植物根表铁膜的相关研究中,国内外学者主要针对水稻^[15-18]、芦苇^[19-20]、香蒲^[3,21]等植物的根表铁膜展开了大量的研究。刘文菊等^[22-24]曾对湿地植物根表铁膜的形成机制及生态效应有着详细的论述。本文在以上综述的基础上,结合近五年铁膜的研究文献,对湿地植物根表铁膜的形成机制及生态效应方面的内容进行了补充,并从根表铁膜的表征技术方面进一步论述了根表铁膜的作用机制,内容集中在 3 个方面:一是湿地植物根表铁膜的形成及其影响因素^[19,25];二是湿地植物根表铁膜产生的生态效应(重金属、营养元素等)^[10, 26-27];三是根表铁膜的表征技术^[4, 28-29]。

1 湿地植物根表铁膜的形成及影响因素

1.1 湿地植物根表铁膜的形成与分布

研究表明,湿地植物为了适应渍水环境,根系和地上部分均能形成大量的通气组织^[30-31],可以通过叶片将大气中的氧气输送到植物根系,由根系将这部分氧气和其他的氧化性物质释放到根际,使渍水土壤中存在的还原性物质 Fe^{2+} 发生氧化,生成铁氧化物/氢氧化物,这种物质可在湿地植物的根表沉积,通过这种连续的氧化作用所形成的铁氧化物/氢氧化物呈胶膜状态包裹在根表,称之为铁膜^[32-35],其反应过程可用 $4\text{Fe}_2 + \text{O}_2 + 10\text{H}_2\text{O} = 4\text{Fe}(\text{OH})_3 + 8\text{H}^+$ 表示。

至今,已发现多种湿地植物根表可形成铁膜,如:沉水植物、挺水植物、浮水植物、沼泽植物、湿地木本植物等。另外,一些无脊椎动物、细菌的表面也发生有类似的现象^[36]。表 1 为已报道的根表可形成铁膜的主要湿地植物种类。

铁膜在根表的沉积部位与植物种类、根系的氧化能力和介质中铁的有效性有关。一般在距离根尖 1 cm 的位置开始形成铁膜^[20,34],植物根的伸长区、根毛区及靠近根基的部位形成的铁膜较多^[20],幼嫩的主根根尖和新生成的根毛上形成的铁膜少^[32]。铁膜在不同植物根表沉积的形式也存在差异。Chen 等^[32]通过观察发现,铁膜在植物根表皮细胞壁内外形成表面光滑中空的铁氧化物多面体;Taylor^[34]通过水培实验观察到,香蒲根表铁膜可以渗透到根系

外皮层内约 3 层细胞厚度的部位;而 Batty 等^[20]在芦苇的水培实验中却发现铁膜并不会渗透到组织细胞内部,而是不均匀地沉积在细胞外;Chabbi^[41]则发现球状灯芯草根表铁膜多分布在周皮、外皮层和内皮层,而在皮层和薄壁组织铁膜分布较少;Wan 和 Peverly^[46]则认为芦苇根际 CO_2 促使了除根尖以外的根系其他部位铁膜的形成。

表 1 已发现根表有铁膜的湿地植物

Table 1 The wetland plants species with iron plaque

类别 Category	植物名称 Species	资料来源 Reference
沉水植物 Submerged plant	锯齿叶水丝草 <i>Cymodocea serrulata</i>	[33]
	伊乐藻 <i>Elodea canadensis</i>	[37]
	菹草 <i>Potamogeton crispus</i>	[38]
浮水植物 Floating plant	紫萍 <i>Spirodela polyrrhiza</i> L.	[39]
	水禾 <i>Hygroryza aristata</i> (Retz.) Nees	[3]
	萍蓬草 <i>Nuphar pumilum</i> (Hoffm.) DC	[3]
挺水植物 Emerged plant	水稻 <i>Oryza sativa</i>	[40]
	香蒲 <i>Typha latifolia</i>	[21]
	芦苇 <i>Phragmites australis</i>	[35]
	球根状灯心草 <i>Juncus bulbosus</i>	[41]
	大米草 <i>Spartina alterniflora</i>	[42]
	野慈姑 <i>Sagittaria trifolia</i>	[3]
	水葱 <i>Scripus tabernaemontani</i> Gmel.	[3]
	泽泻 <i>Alisma plantago-aquatica</i> Linn.	[3]
	石菖蒲 <i>Acorus gramineus</i> L.	[3]
	花蔺 <i>Butomus umbellatus</i> L.	[3]
	海寿花 <i>Pontederia cordata</i> L.	[3]
	再力花 <i>Thalia dealbata</i> L.	[3]
	藨草 <i>Phalaris arundinacea</i>	[43]
	茭白 <i>Zizania ceduiciflora</i>	[44]
	美人蕉 <i>Canna indica</i>	[44]
	芦竹 <i>Arundo donax</i> Linn	[45]
	花叶冷水花 <i>Pilea cadierei</i>	[8]
沼泽植物 Marsh plant	荆三棱 <i>Scirpus maritimus</i>	[28]
湿地木本 植物	红树 <i>Rhizophoraceae</i>	[2]
	木榄 <i>Bruguiera gymnorrhiza</i>	[9]
Wetland wood	海漆 <i>Excoecaria agallocha</i>	[9]
	老鼠簕 <i>Acanthus ilicifolius</i>	[9]
	柳树 <i>Willow</i>	[4]
	海刀豆 <i>Canavalia rosea</i> DC	[10]
	厚藤 <i>Ipomoea pes-caprae</i> L.	[10]

1.2 湿地植物根表铁膜形成的影响因素

湿地植物根表铁膜的形成必须具备两个条件,一是植物根际处于局部氧化状态,二是生长介质中

存在大量的 Fe^{2+} 。目前在湿地植物根表铁膜的形成及影响因素方面主要针对 Fe^{2+} 浓度、根系的氧化能力、植物种类等进行研究。

(1) Fe^{2+} 浓度

介质中 Fe^{2+} 浓度是影响根表铁膜形成的重要因素之一。研究表明,培养液中 Fe^{2+} 浓度从 0 增加到 100 mg/L 时,香蒲根表铁膜的量呈非线性增加趋势^[34];水稻根表铁膜的量与溶液中铁的浓度具有明显的正相关性^[10, 47-48]。Xu 等^[44]对灯芯草等的研究也表明,向土壤中加入铁能增加湿地植物根表铁膜的含量,其原因是湿地植物根系能释放氧气和一些氧化物质,使植物根际的氧化还原电位增加并呈氧化状态,向土壤中加入铁后,更多的 Fe^{2+} 向植物根际迁移,在植物根表被氧化形成铁膜,导致植物根表铁膜含量增加。史锟等^[49]对水稻的研究也得出了相似的结论,施加铁后,湿地植物根表铁膜中铁的含量比没有施加的高,尤其是水稻孕穗期,根表铁膜的量随着施铁量的增加而增加。傅友强等^[25]则对植物进行添加 FeCl_3 和 FeCl_2 处理,发现 FeCl_2 能提高根系抗氧化酶活性,增加水稻根表铁膜的量。

除了介质中 Fe^{2+} 的浓度之外,影响铁的有效性 and 溶解性的因素均可影响铁膜的形成^[50]。研究表明,铁膜的形成与土壤中有有机质和无机碳酸盐呈显著负相关,黏粒含量高的土壤形成铁膜数量少^[51],土壤中有有机质增多,有机质的分解造成水稻根系生长环境的氧化还原电位降低,从而使土壤溶液中铁的移动性增强,促进更多的 Fe^{2+} 向根表迁移,由于水稻根系的氧化作用,使还原态 Fe^{2+} 被氧化而在根表沉积形成较厚的铁膜^[16, 52]。

另外,生长介质中 P 或 S 的供应状况显著影响水稻根表铁膜的形成^[53-54]。营养液中缺 P 的水稻根系铁膜比正常供磷高出 57.5% — 84.5%^[54],增施硫肥显著增加了水稻根际铁膜的含量^[53],但是加硅处理却明显降低了水稻根表铁膜的数量^[55]。

(2) 根系的氧化能力

植物根的氧化能力被认为是根表铁膜形成的最主要的生物因素之一^[56]。植物根系的氧化性物质主要包括根系氧化酶、根系分泌氧化性物质、氧气和根际氧化性微生物^[54, 57-58]。邓泓等^[59-60]研究发现植物根系具有泌氧的特征,对淹水环境下根际土壤重金属的化学行为和化学变化具有重要的作用。根系

释放氧的能力不同,从而使根系氧化力不同,根系氧化力强的其根表形成的铁膜量较多^[61]。张西科等^[62-63]研究表明,不同基因型水稻之间根系氧化能力的差异可能会导致根表铁氧化物胶膜沉积量的差异。Wu 等^[61]对水稻的研究则发现水稻根系通气组织和根系泌氧对根表铁膜的形成具有显著的相关性。此外,水稻根系分泌的过氧化物酶和过氧化氢酶具有将 Fe^{2+} 氧化为 Fe^{3+} 的能力^[64]。铁氧化细菌^[57]和甲烷氧化细菌^[58]对根表铁膜的形成也起到一定的作用。但根系分泌物和微生物对铁膜形成的影响并没有深入的研究。

(3) 湿地植物种类

湿地植物种类也是影响铁膜形成的重要因素。不同种类和品种的湿地植物生长机制、根系泌氧能力、分泌质子和其他化合物的能力有所不同,形成铁膜的数量有明显的差异。具有较高比表面积根系的植物能形成更多的铁膜^[65]。Hupfer 和 Dollan^[37]通过水培实验研究菹草和伊乐藻两种植物根表铁膜时,发现铁膜形成的差异主要是根的形态差异造成的,伊乐藻的根粗,但数量少,因此其表面积小,根表形成的铁膜量也相对较少,而菹草根细且多,其表面积大,根表形成的铁膜量也较多。有研究表明,灯心草根表铁膜含量分别是茭白和美人蕉的 2.93 和 10.58 倍^[44]。芦竹和香蒲根表铁膜的量(以根系鲜重计)分别为 20170.8 和 7640.3 mg/kg ^[45]。

不同品种的水稻形成铁膜的数量也存在明显差异^[40,66],刘敏超等^[67]报道 14 个水稻品种间根表铁膜的量相差 2.6 倍。不同水稻品种的根系孔隙率和根际放氧量不同,通气组织结构越发达,植物根际释放氧的量越大^[68]。杨婧等^[17]通过 SEM 观察发现,通气组织结构好的扬稻 6 号比农垦 57 号形成的铁膜多。孟冬梅等^[52]研究表明水稻根系通气组织和根表铁膜的量呈正相关的趋势,并且探索出加入硫酸和有机质能够改变水稻根系通气组织的大小进而影响根表铁膜的数量。

尽管不同条件下采集或培养的不同植物根表铁膜的绝对数量差异较大,但根表铁膜中铁占植物根系铁总量的比例均在 90% 左右。例如,湿地条件下采集的芦苇根表铁膜中含铁约 98% — 99%^[69],香蒲根表铁膜中含铁达 85%^[19]。溶液培养的水稻根系铁膜中铁含量平均为 94%^[47]。由此可见整个根

系的铁主要集中在根表铁膜中,根组织中铁所占比例很小,说明植物根系形成铁膜的能力很强。

2 湿地植物根表铁膜的植物营养效应

湿地植物根表铁膜是一种两性胶体,对土壤中营养元素具有富集作用,从而影响植物对养分元素的吸收。

有研究认为,植物根表铁膜是营养元素的富集库^[70-71]。水稻根表铁膜能够在近根区域富集大量铁、磷、锌、镁、锰等植物必须的营养元素,当介质中养分缺乏时,铁膜富集的营养元素能够被植物活化吸收利用^[7,15,35,42]。Ye 等^[72]研究发现,根表覆有铁膜的香蒲,其根和地上部分含铁量分别是无铁膜的 32 倍和 6 倍,说明香蒲能够吸收根表铁膜中的铁。植物根表铁膜对土壤中的磷酸根离子具有较强的吸附能力,当介质中磷缺乏时又可被植物活化吸收,根表覆有铁膜的苔草和香蒲植物体内磷浓度要比无铁膜的高^[51,73]。高浓度的 Fe 和 P 能促进冷水花植物对 P 的吸收^[8]。红树属树木根表形成的铁膜对重金属和 P 都具有截留作用^[9]。香蒲根表铁膜增加了植物根系磷累积量和植物地上部的磷累积量^[26]。有铁膜沉积的芦竹和香蒲 P 元素利用的有效性比无铁膜的高^[45]。Zhou 等^[74]对水稻根表铁膜吸附 Se 的研究也得出了相似的结论。然而,曾祥忠等^[75]人发现根表铁膜的形成会抑制植物对磷的吸收。造成根表铁膜抑制磷吸收的原因可能是由于铁膜中铁氧化物对磷具有很强的亲和力,其吸附的磷增多,从而降低了根际磷的有效性,并导致植物可利用的磷减少。

也有研究认为,铁膜对营养元素的富集作用与铁膜的量有关。Christensen 和 Wigand^[76]通过野外调查研究山梗菜时发现,当铁膜的量大于 30 $\mu\text{mol/g}$ 时,植株中 P 的含量降低,但是铁膜量小于 30 $\mu\text{mol/g}$ 时,植株中的 P 含量与沉积物中植物可利用 P 的含量呈显著正相关,表明厚的铁膜降低了 P 的吸收。Zhang 等^[77]对水稻根表铁膜的研究也发现,当铁膜的量在 24570 mg Fe/kg RDW 范围内,随着铁膜量的增加,P 的吸收呈增加趋势,而当铁膜量达到 28260 mg Fe/kg RDW 时,植物体内 P 的含量反而下降。Otte 等^[35]在研究根表铁膜影响紫苑吸收锌时发现,铁膜能吸附土壤中的锌,并在一定范围内,随铁膜厚度的增加,锌的吸附量不断增加,这些养分解吸后能

被植物吸收利用。但是,如果铁膜厚度大于 2000 nmol/cm² 时,锌在铁膜上的富集就会减少,植物的吸收量也随之下落,当铁膜的量增加到 12100 mg/kg 时,水稻对锌的吸附量达到最大。而后,随着铁膜数量的增加,铁膜反而会阻碍水稻对锌的吸收^[15]。这主要是因为铁膜有较多的负电荷基团,铁膜能增加锌的吸附位点,成为锌的富集库,增加植物对锌的吸收;如果包被在根表的铁膜太厚时,因根-铁界面锌的数量有限,尽管铁膜上吸附的锌较多,但吸附在铁膜外表的锌要经过解吸附及跨越铁膜等复杂过程才能到达根表,故吸收量反而下降,因此,植物根表铁膜对锌的吸收主要取决于根表铁膜的数量。

总之,根表铁膜在一定程度上是一个土壤养分的富集库,氧化物膜的厚度是养分富集能力的一个重要因素,另外,介质中养分的浓度、土壤中铁膜的含量和植物根系的氧化能力等也会影响养分的富集。

3 湿地植物根表铁膜对重金属的生态修复效应

根表形成的铁氧化物与自然界的铁氧化物有相似的特征,具有较高的比表面积和-OH 功能团,具有化学吸附特性,能起一定的氧化还原作用,能与金属和其它的阴、阳离子反应。具有潜在的净化重金属污染的功能。田间观察发现,根表有铁膜的湿地植物能够在重金属污染的土壤或强酸性的矿区土壤中生存,这引起了许多生态和环境学家的重视,希望应用植物根表铁膜进行土壤植物修复,解决生态环境问题。

众多研究表明,植物根表铁膜对重金属元素的吸收和运输起阻碍作用。根表有铁膜的植物受铜毒、铝毒作用小,可能是铜在根皮层被铁钝化以及铝与磷酸盐共沉淀于植物根表,形成了与铁膜相似的物质所致^[1,5,78]。水稻根表铁膜对 Cd、Pb 能产生富集作用,随着根表铁膜量的增加,根表铁膜富集的 Cd、Pb 的含量也增加^[66,79],而且根表铁膜可以阻止 Pb、Cd 向水稻植株移动^[66,80]。铁膜还能对 Sb 产生富集作用,大约有 60% — 80% Sb(III) 和 40% — 60% Sb(V) 累积在水稻根表铁膜中^[18,27]。有铁膜的水稻根内和地上部分 Se 的含量随铁膜数量的增加而下降^[74]。

目前研究最多的是根表铁膜对砷的影响^[40,65],砷是一种“类金属”,对铁氧化物具有高度亲和性,可

与铁氧化物发生吸附和共沉淀作用。Hossain 等^[71]的研究发现,砷在水稻根表铁膜中的含量超过了根际土壤。铁膜能够富集土壤中的砷,对土壤中砷的迁移转化起促进作用^[4,81-82]。Liu 等^[16]的研究表明铁膜对 As⁵⁺ 的影响大于对 As³⁺ 的影响,当添加 As³⁺ 时,大部分砷集中在根组织,而添加 As⁵⁺ 时,大部分砷集中在根表铁膜上。Hansel 等^[83]则发现根表铁膜上的砷主要是砷酸盐(占 82%),亚砷酸盐的含量很少。经过砷酸盐和亚砷酸盐处理的水稻,水稻内亚砷酸盐的含量均较高^[61]。Chen 等^[84]也得出了相似的结论。Otte 等^[42]则认为紫苑根表铁膜可通过氧化还原反应将毒性很强的 As³⁺ 转化为毒性较弱的 As⁵⁺,这是植物去除砷毒害的重要机制之一。

铁膜还可促进植物对重金属元素的吸收。刘艳菊等^[85]的研究表明,水稻吸收的铅约有 75% 在根组织中,只有 25% 富集在根表铁膜中,水稻根表铁膜可能在一定程度上促进 Pb 向水稻根内的转运。紫苑根中砷的浓度与铁膜及根中铁的浓度相关系数分别达到 0.868 和 0.969,地上部分组织中砷的浓度与铁浓度的相关系数也达到 0.907,均达显著性水平,说明铁膜在植物对砷的吸收和转运上起着促进作用^[42]。

也有一些研究表明少量铁膜能促进植物对重金属元素的吸收,而大量铁膜则阻止植物对重金属元素的吸收。依纯真等^[13,86]的研究表明,在铁浓度约 40 mg/L 时,水稻根表形成的铁膜厚度使水稻地上部分和根中镉含量均达最高,铁浓度下降时,镉含量呈下降趋势。刘文菊等^[67,87]通过水培实验也发现水稻根表铁膜对介质中 Cd 的吸收及其在水稻体内的转移起重要作用,既可以促进也可以抑制水稻根系对 Cd 的吸收,当根表铁膜较薄时可以促进水稻对镉的吸收,在铁膜数量达到 20825 mg/kg 干根重时促进作用达到最大,而后随着铁膜数量的继续增加,反而抑制水稻根系对镉的吸收。究其原因,可能是根-铁膜界面的镉数量有限,吸附在铁膜外表的镉要经过解吸和跨越铁膜等复杂过程之后才能到达根表,故吸附量反而下降,因此,根表铁膜是土壤中镉进入水稻体内的界面,铁膜的物理、化学性质直接影响土壤中镉进入植株体内。

4 湿地植物根表铁膜的表征技术

目前,运用于湿地植物根表铁膜的表征技术主

要有显微镜、扫描/透射电子显微镜技术(S/TEM)、X-射线衍射分析(XRD)技术、X-射线吸收光谱分析(XAS)技术、X-射线微探针技术(EPXM)、X-射线荧光影像(XRF)技术、能量色散光谱(EDS)技术以及X射线吸收精细结构谱(XAFS)技术等,主要应用于根表铁膜的分布、铁膜的矿物组成分析以及根表铁膜对元素的吸附机理分析。

4.1 根表铁膜的分布及矿物学组成

据文献报道,除了肉眼可见渍水植物根表有铁膜沉积,显微镜是最早运用于观察实验室诱导水稻^[32,88]、香蒲^[34]等根表形成的铁膜的手段。St-Cyr等^[89]利用高放大倍率的S/TEM观察了野芹菜根表铁膜的形态,铁膜是由多种形态的铁颗粒物、微生物和一些粘土组成,铁膜包裹着微生物附着在根表,根尖没有铁膜。Lee等^[40]则通过显微镜观察到水稻根表铁膜覆着在外表皮细胞上,并向内渗透到皮质或通气组织上,但很少延伸到内皮层。

氧化铁的形态按矿物学区分,有水铁矿、纤铁矿、针铁矿、赤铁矿等。除水铁矿为无定形外,其他几种都是以结晶态存在。无定形态的铁氧化物比表面积大、羟基释放量高,具有很好的活性。Bacha和Hossner^[88]利用XRD技术证明水稻根表铁膜的基本成分只有纤铁矿。St-Cyr等^[89]通过XRD数据分析可知铁膜主要是有不定形态和结晶态铁组成。而Taylor等^[34]则利用SEM观察发现香蒲细胞间和细胞表面沉积的铁膜主要为不定形态的铁。Batty等^[90]通过SEM-EDS联用技术分析发现芦苇根表铁膜主要也是不定形态铁。Hansel等^[43]利用XAS技术发现藨草根表铁膜由63%水铁矿、32%针铁矿和5%菱铁矿组成,而香蒲根表铁膜由49%水铁矿、18%针铁矿、5%的菱铁矿及28%的纤铁矿组成^[83]。Liu等^[63]通过XAFS技术发现,水稻根表铁膜水铁矿占81%—100%,针铁矿占19%。

由此可见,植物根表形成的铁膜由不同形态的铁组成,这些物质可能是结晶态的,也可能是不定形态的。在铁膜形成发育过程中,不同的组分间还可相互转化,且形态的变化取决于温度、pH、CO₂、土壤有机质的含量、植物根系分泌物等。Chen等^[51]报道,铁膜的结晶态组分是在较为炎热的气候下形成的,土壤的高pH、低Eh环境有利于针铁矿的形成。Steyr等^[19]则发现,土壤中的CO₂浓度越高,通透性

越好,针铁矿形成的可能性就越大。Wang和Peverly^[46]则推测土壤中FeCO₃含量较高,与O₂接触反应后可转化为针铁矿,而湿地条件更利于形成针铁矿。

4.2 植物根表铁膜对营养元素和重金属的吸附机理

目前,用于测定植物根表铁膜的含量和形态的方法主要是DCB浸提法(Dithionite-Citrate-Bicarbonate)和EDTA/BPDS(Ethylene Diamine Tetraacetic Acid)/(Bathophenanthroline Disulfonate),DCB浸提法通过测定根表铁膜中铁的含量以及吸附在铁膜上元素的含量来推测铁膜对元素的吸附效应,EDTA/BPDS则可以分析铁膜中铁的形态,但这两种方法都无法确定根表铁膜中铁氧化物与元素的结合形态和分布特征。近年来,利用矿物、植物样品的表征技术来探讨根表铁膜与元素的结合形态取得了一定的进展。

Hansel等^[43]利用显微镜和光谱分析技术,发现铁和铅在根表面的分布形式相似,都在根表形成了环状的一圈。Pb-O原子间距为2.4,与Pb吸附在铁的氧化物/氢氧化物上的原子间距2.27不相符合,反而与铅吸附在有机酸和矿物质生物膜的间距2.4相符,通过EXAFS分析表明,铅不是与铁氧化物/氢氧化物形成复合物,而是与细菌生物膜等有机功能团相结合形成了有机铅复合物。相反,锰和锌形成独立的金属碳酸盐(菱锰矿/水锌矿)附着在根表。Cai等^[5]则通过显微镜及桑色素荧光法分析铝沉积的部位,结果表明铝不是与铁氧化物相结合,而是形成了磷酸盐与铁膜并列在根表沉积。

铁膜对磷和砷的作用机制与铅和铝等不同,磷和砷与铁主要以专性吸附的形式在根表铁膜中存在。Crowder和St-Cyr^[91]认为磷酸根通过内核配合作用强烈吸附在铁氧化物表面上形成Fe-P配合物,当介质中磷酸盐浓度较高时,铁氧化物与磷酸盐形成单核配合物(Fe·OPC(O₃)或FeOOC-COOH),易于解吸附,在磷酸盐离子浓度较低时,却形成双核配合物(Fe·OP(O₂)O·Fe或FeOOC-COOFe),吸附较紧密,难以解吸附,从而抑制植物对磷的吸收。

Voegelin等^[92]通过XRF和EXAFS技术从分子尺度分析砷在铁膜上的界面吸附机制,通过XAFS图谱判断砷酸盐在铁膜上与铁氧化物形成了内层复合物。AsO₄四面体与FeO₆八面体以角-角结合的方

式形成双齿双核的内层复合产物(图1)^[93]。铁氧化物对 As^{5+} 和 As^{3+} 都有较强的吸附能力,但这种吸附能力是由环境的氧化状态和铁氧化物的矿物组成决定的。水合铁矿向针铁矿发展可减少砷结合位点的密度,从而一部分吸附态砷由氧化物表面解吸出来^[22]。在氧化条件下,以 As^{5+} 为主要的存在形态^[22],在 pH 值小于 6 的条件下, Eh 越高,铁膜上的砷以五价砷为主,相反,以三价砷为主^[4]。Blute 等^[94]通过 XANES 分析芦苇和香蒲根表铁膜中的铁主要是三价铁,大约有 20% 的三价砷和 80% 的五价砷吸附在铁膜上。Liu 等^[63]则通过 XANES 分析表明,根表铁膜上吸附的砷以砷酸盐为主,而水稻谷粒中主要是无机砷和 DMA。而陈学萍等^[29]采用 EXAFS 谱分析得出五价砷和铁以砷酸铁的形式共沉淀,在厌氧的还原条件下,砷的主要存在形态为三价砷。

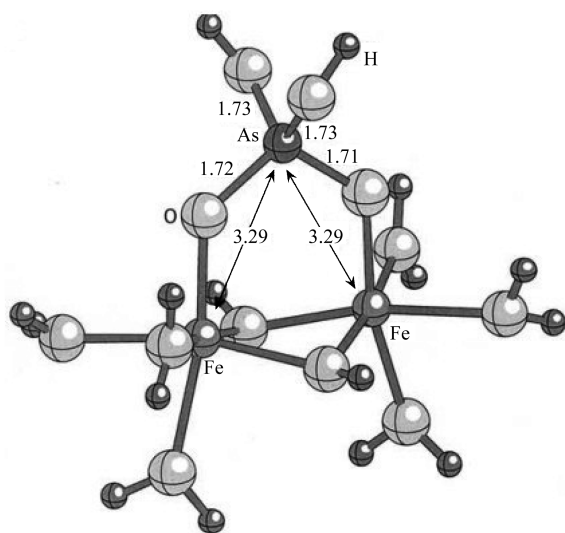


图1 AsO_4 四面体与 FeO_6 八面体的双齿双核内层复合物^[93]

Fig.1 The bidentate corner-sharing complex of AsO_4 tetrahedra and FeO_6 polyhedra^[93]

由此可见, X-射线吸收精细结构谱分析技术(XAFS)等技术可以直接得到植物体内微量元素的氧化态、近边原子和配位数等化学信息,而不需要对样品进行复杂的提取和分离等前处理。对全面探讨根表铁膜的形成机理及生态环境效应具有重要意义。

5 展望

根表铁膜在湿地植物根-土界面的研究已经成

为湿地环境科学研究中的热点,根表铁膜作为营养物质和污染物进入植物体内的门户,研究其作用机理及调控机制具有重要的生态环境意义。国内外学者针对水稻根表铁膜对养分的富集、吸收以及重金属污染的控制问题上取得了一定的成就,但仍有一些问题需要进一步探讨,这主要包括以下几个方面:

(1) 扩大研究领域。目前的研究大多侧重于农业生产中水稻根表铁膜对养分的吸收富集和对重金属污染的控制,对人工湿地处理污染物开展了一些研究,但对天然湖泊湿地植物根表铁膜的研究较少。因此,今后的研究应该扩大研究领域,如以天然湿地优势植物作为研究对象,提高湿地植物对污染物的净化作用,为湿地的管理提供科学的依据;

(2) 铁膜形成的影响因素。目前的研究多侧重于土壤和生物因素的影响,对环境因素的研究较弱,尤其是水文情势的变化对铁膜的形成、生长、脱落这一动态变化过程的影响研究较少。此外根系分泌物、根际微生物等也可影响铁膜的形成以及其发挥效应的程度,目前这方面的研究还鲜有报道;

(3) 植物生理形态的变化。铁膜的形成与植物的生理、形态的变化密切相关,目前大多从对植物根系、植株的生长状况分析铁膜对植物的影响,对植物逆境生理生化(如酶系统、光和作用等)的影响研究尚比较薄弱;

(4) 研究手段和技术。根表铁膜的特性直接影响其对污染物的净化能力,传统的测定方法已经不能满足根表铁膜的研究要求,需要应用多领域多学科的先进技术全面探讨根表铁膜形成的机理及生态效应,如利用离子选择电极测定根系氧气释放的动态变化;利用色谱-质谱仪测定根系和根分泌物中氧化性物质的种类和数量;利用 XAFS 等技术从分子生物学水平上研究铁膜的形成及作用机制等。为解决湿地系统中的重金属污染提供合理的防治和修复措施。

References:

- [1] Greipsson S, Crowder A A. Amelioration of copper and nickel toxicity by iron plaque on roots of rice (*Oryza-Sativa*). Canadian Journal of Botany-Revue Canadienne De Botanique, 1992, 70 (4): 824-830.
- [2] Machado W, Gueiros B B, Lisboa-Filho S D, Lacerda L D. Trace metals in mangrove seedlings: role of iron plaque formation.

- Wetlands Ecology and Management, 2005, 13(2): 199-206.
- [3] Zhong S Q, Wu Y P, Xu J M. Phosphorus utilization and microbial community in response to lead/iron addition to a waterlogged soil. Journal of Environmental Sciences-China, 2009, 21(10): 1415-1423.
- [4] Zimmer D, Kruse J, Baum C, Borca C, Laue M, Hause G, Meissner R, Leinweber P. Spatial distribution of arsenic and heavy metals in *willow* roots from a contaminated floodplain soil measured by X-ray fluorescence spectroscopy. Science of the Total Environment, 2011, 409(19): 4094-4100.
- [5] Cai M Z, Zhang S N, Xing C H, Wang F M, Zhu L, Wang N, Lin L Y. Interaction between iron plaque and root border cells ameliorates aluminum toxicity of *Oryza sativa* differing in aluminum tolerance. Plant and Soil, 2012, 353(1/2): 155-167.
- [6] Huang H, Zhu Y G, Chen Z, Yin X X, Sun G X. Arsenic mobilization and speciation during iron plaque decomposition in a paddy soil. Journal of Soils and Sediments, 2012, 12(3): 402-410.
- [7] Jiang F Y, Chen X, Luo A C. Iron plaque formation on wetland plants and its influence on phosphorus, calcium and metal uptake. Aquatic Ecology, 2009, 43(4): 879-890.
- [8] Yang L F, Li Y W, Yang X Y, Xiao H, Peng H, Deng S H. Effects of iron plaque on phosphorus uptake by *Pilea cadieri* cultured in constructed wetland. Procedia Environmental Sciences, 2011, 11: 1508-1512.
- [9] Pi N, Tam N F, Wong M H. Formation of iron plaque on mangrove roots receiving wastewater and its role in immobilization of wastewater-borne pollutants. Marine Pollution Bulletin, 2011, 63(5/12): 402-411.
- [10] Siqueira-Silva A I, Da Silva L C, Azevedo A A, Oliva M A. Iron plaque formation and morphoanatomy of roots from species of restinga subjected to excess iron. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2012, 78: 265-275.
- [11] Armstrong W. Oxygen diffusion from the roots of some British bog plants. Nature, 1964, 204(4960): 801-802.
- [12] Armstrong W. The oxidising activity of roots in waterlogged soils. Physiologia Plantarum, 1967, 20(4): 920-926.
- [13] Yi C Z, Li H F, Zhang F S. Effect of iron coatings of rice roots on plant absorption of cadmium. Acta Agriculturae Universitatis Pekinensis, 1994, 20(4): 375-379.
- [14] Zhang X K, Zhang F S, Mao D R. Effect of root iron plaque on zinc uptake by rice. Chinese Journal of Applied Ecology, 1996, 7(3): 262-266.
- [15] Zhang X K, Zhang F S, Mao D R. Effect of iron plaque outside roots on nutrient uptake by rice (*Oryza sativa* L.). zinc uptake by Fe-deficient rice. Plant and Soil, 1998, 202(1): 33-39.
- [16] Liu W J, Zhu Y G, Smith F A, Smith S E. Do iron plaque and genotypes affect arsenate uptake and translocation by rice seedlings (*Oryza sativa* L.) grown in solution culture? Journal of Experimental Botany, 2004, 55(403): 1707-1713.
- [17] Yang J, Hu Y, Wang X J, Chen X P, Huang Y Z, Zhu Y G. Differences of iron plaque formation and as accumulation between two rice cultivars with different aerenchyma tissue. Asian Journal of Ecotoxicology, 2009, 4(5): 711-717.
- [18] Okkenhaug G, Zhu Y G, He J W, Li X, Luo L, Mulder J. Antimony (Sb) and Arsenic (As) in Sb mining impacted paddy soil from Xikuangshan, China: differences in mechanisms controlling soil sequestration and uptake in rice. Environmental Science & Technology, 2012, 46(6): 3155-3162.
- [19] Steyr L, Crowder A A. Factors affecting iron plaque on the roots of *Phragmites-Australis* (Cav.) Trin. ex Steudel. Plant and Soil, 1989, 116(1): 85-93.
- [20] Batty L C, Baker A J M, Wheeler B D. Aluminium and phosphate uptake by *Phragmites australis*: the role of Fe, Mn and Al root plaques. Annals of Botany, 2002, 89(4): 443-449.
- [21] Ye Z H, Cheung K C, Wong M H. Copper uptake in *Typha latifolia* as affected by iron and manganese plaque on the root surface. Canadian Journal of Botany-Revue Canadienne De Botanique, 2001, 79(3): 314-320.
- [22] Liu W J, Zhu Y G. Iron and Mn plaques on the surface of roots of wetland plants. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(2): 358-363.
- [23] Yao H X, Ye Z H. Iron plaques on wetland plant root surface: A review. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(11): 2374-2380.
- [24] Fu Y Q, Yu Z W, Cai K Z, Shen H. Mechanisms of iron plaque formation on root surface of rice plants and their ecological and environmental effects: a review. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(6): 1527-1534.
- [25] Fu Y Q, Liang J P, Yu Z W, Wu D M, Cai K Z, Shen H. Effect of different iron forms on iron plaque on root surface and iron uptake in rice seedlings. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(5): 1050-1057.
- [26] Liu J, Chen X, Luo A C, Wang S S, Ju W W. Role of root surface iron plaque in phosphorous removal from wastewater by wetland plants. Journal of Zhejiang University, 2011, 37(2): 224-230.
- [27] Huang Y C, Chen Z, Liu W J. Influence of iron plaque and cultivars on antimony uptake by and translocation in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings exposed to Sb(III) or Sb(V). Plant and Soil, 2012, 352(1/2): 41-49.
- [28] Taggart M A, Mateo R, Charnock J M, Bahrami F, Green A J, Meharg A A. Arsenic rich iron plaque on macrophyte roots-an ecotoxicological risk? Environmental Pollution, 2009, 157(3): 946-954.
- [29] Chen X P, Zhu Y G, Hong M N, Wang X J, Gault A G, Charnock J M, Polya D A. Characteristics of Fe and As in the rice rhizosphere with different fertilizer amendments. Environmental Chemistry, 2008, 27(2): 231-234.
- [30] Colmer T D. Long-distance transport of gases in plants: a

- perspective on internal aeration and radial oxygen loss from roots. *Plant, Cell and Environment*, 2003, 26(1): 17-36.
- [31] Shimamura S, Mochizuli T, Nada Y, Fukuyama M. Formation and function of secondary aerenchyma in hypocotyl, roots and nodules of *soybean* (*Glycine max*) under flooded conditions. *Plant and Soil*, 2003, 251(2): 351-359.
- [32] Chen C C, Dixon J, Turner F. Iron coatings on rice roots: morphology and models of development. *Soil Science Society of America*, 1980, 44(5): 1113-1119.
- [33] Povidisa K, Delefosse M, Holmer M. The formation of iron plaques on roots and rhizomes of the seagrass *Cymodocea serrulata* (R. Brown) Ascherson with implications for sulphide intrusion. *Aquatic Botany*, 2009, 90(4): 303-308.
- [34] Taylor G J, Crowder A A, Rodden R. Formation and morphology of an iron plaque on the roots of *Typha-Latifolia* L. grown in solution culture. *American Journal of Botany*, 1984, 71(5): 666-675.
- [35] Otte M L, Rozema J, Koster L, Haarsma M S, Broekman R A. Iron plaque on roots of *Aster-Tripolium* L-interaction with zinc uptake. *New Phytologist*, 1989, 111(2): 309-317.
- [36] Etherington J R. *Wetland Ecology: Studied in Biology*. London: Edward Arnold, 1983: 154.
- [37] Hupfer M, Dollan A. Immobilisation of phosphorus by iron-coated roots of submerged macrophytes. *Hydrobiology*, 2003, 506-509 (1): 635-640.
- [38] Mi W J, Cai J B, Tuo Y, Zhu H, Hua Y M, Zhao J W, Zhou W B, Zhu D W. Distinguishable root plaque on root surface of *Potamogeton crispus* grown in two sediments with different nutrient status. *Limnology*, 2013, 14(1): 1-11.
- [39] Rahman M A, Hasegawa H, Ueda K, Maki T, Rahman M M. Arsenic uptake by aquatic macrophyte *Spirodela polyrhiza* L.: Interactions with phosphate and iron. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 160(2/3): 356-361.
- [40] Lee C H, Hsieh Y C, Lin Z H, Lee D Y. Iron plaque formation and its effect on arsenic uptake by different genotypes of paddy rice. *Plant and Soil*, 2013, 363(1/2): 231-241.
- [41] Chabbi A. *Juncus bulbosus* as a pioneer species in acidic lignite mining lakes: interactions, mechanism and survival strategies. *New Phytologist*, 1999, 144(1): 133-142.
- [42] Otte M L, Dekkers M J, Rozema J, Broekman R A. Uptake of arsenic by *Aster-Tripolium* in relation to rhizosphere oxidation. *Canadian Journal of Botany-Revue Canadienne De Botanique*, 1991, 69(12): 2670-2677.
- [43] Hansel C M, Fendorf S, Sutton S, Newville M. Characterization of Fe plaque and associated metals on the roots of mine-waste impacted aquatic plants. *Environmental Science & Technology*, 2001, 35(19): 3863-3868.
- [44] Xu D F, Xu J M, He Y, Huang P M. Effect of iron plaque formation on phosphorus accumulation and availability in the rhizosphere of wetland plants. *Water Air and Soil Pollution*, 2009, 200(1/4): 79-87.
- [45] Wang Z Y, Liu L H, Wen S F, Peng C S, Xing B S, Li F M. Effect of iron plaque on root surfaces on phosphorus uptake of two wetland plants. *Environmental Science*, 2010, 31(3): 781-786.
- [46] Wang T G, Peverly J H. Iron oxidation states on root surfaces of a wetland plant (*Phragmites australis*). *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63(1): 247-252.
- [47] Liu H J, Zhang J L, Zhang F S. Role of iron plaque in Cd uptake by and translocation within rice (*Oryza sativa* L.) seedlings grown in solution culture. *Environmental and Experimental Botany*, 2007, 59(3): 314-320.
- [48] Zhou X B, Shi W M, Zhang L H. Iron plaque outside roots affects selenite uptake by rice seedlings (*Oryza sativa* L.) grown in solution culture. *Plant and Soil*, 2007, 290(1/2): 17-28.
- [49] Shi K, Zheng F S, Liu X J, Zhang X D. Effect of different cultivation practices on Fe and Cd content in iron plaque outside rice root and Cd content in rice root. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(8): 1273-1277.
- [50] Rahman M A, Hasegawa H, Ueda K, Maki T, Rahman M M. Influence of EDTA and chemical species on arsenic accumulation in *Spirodela polyrhiza* L. (duckweed). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2008, 70(2): 311-318.
- [51] Chen C C, Dixon J B, Turner F T. Iron plaque on rice roots: Mineralogy and quantity influencing factors. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44: 635-639.
- [52] Meng D M, Zhu Y G, Zhou J G. Study on the relationship between aerenchyma of rice root systems and iron plaque outside roots. *Modern Agricultural Sciences*, 2008, 15(4): 55-58.
- [53] Hu Z Y, Zhu Y G, Li M, Zhang L G, Cao Z H, Smith F A. Sulfur (S)-induced enhancement of iron plaque formation in the rhizosphere reduces arsenic accumulation in rice (*Oryzasativa* L.) seedlings *Environmental Poll*, 2001, 47(2): 387-393.
- [54] Liu W J, Hu Y, Zhu Y G, Gao R T, Zhao Q L. The mechanisms of iron plaque formation on the surface of rice roots induced by phosphorus starvation. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(1): 22-27.
- [55] Guo W, Zhu Y G, Liu W J, Liang Y C, Geng C N, Wang S G. Is the effect of silicon on rice uptake of arsenate (As-v) related to internal silicon concentrations, iron plaque and phosphate nutrition? *Environmental Pollution*, 2007, 148(1): 251-257.
- [56] Mendelsohn I A, Kleiss B A, Wakeley J S. Factors controlling the formation of oxidized root channels-a review. *Wetlands*, 1995, 15(1): 37-46.
- [57] Emerson D, Weiss J V, Megonigal J P. Iron-oxidizing bacteria are associated with ferric hydroxide precipitates (Fe-plaque) on the roots of wetland plants. *Applied and Environmental Microbiology*, 1999, 65(6): 2758-2761.
- [58] King G M, Garey M A. Ferric iron reduction by bacteria

- associated with the roots of freshwater and marine macrophytes. *Applied and Environmental Microbiology*, 1999, 65 (10): 4393-4398.
- [59] Deng H, Ye Z H, Huang M H. Characteristics of radial oxygen loss from root of wetland plants. *Journal of East China Normal University: Natural Science*, 2007, (6): 69-72.
- [60] Wang M Y, Chen A K, Wong M H, Qiu R L, Cheng H, Ye Z H. Cadmium accumulation in and tolerance of rice (*Oryza sativa* L.) varieties with different rates of radial oxygen loss. *Environmental Pollution*, 2011, 159(6): 1730-1736.
- [61] Wu C, Ye Z H, Li H, Wu S C, Deng D, Zhu Y G, Wong M H. Do radial oxygen loss and external aeration affect iron plaque formation and arsenic accumulation and speciation in rice? *Journal of Experimental Botany*, 2012, 63(8): 2961-2970.
- [62] Zhang X K, Yin J, Liu W J, Zhang F S, Mao D R. The nutritional status of P and Zn on rice cultivars with different oxidizing power of roots. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(1): 54-57.
- [63] Liu W J, Zhu Y G, Hu Y, Williams P N, Gault A G, Meharg A A, Charnock J M, Smith F A. Arsenic sequestration in iron plaque, its accumulation and speciation in mature rice plants (*Oryza sativa* L.). *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(18): 5730-5736.
- [64] Ando T Y S, Nishiyama I. Nature of oxidizing power of rice roots. *Plant and Soil*, 1983, 72(1): 57-71.
- [65] Deng D, Wu S C, Wu F Y, Deng H, Wong M H. Effects of root anatomy and Fe plaque on arsenic uptake by rice seedlings grown in solution culture. *Environmental Pollution*, 2010, 158(8): 2589-2595.
- [66] Ma X M, Liu J G, Wang M X. Differences between rice cultivars in iron plaque formation on roots and plant lead tolerance. *Advance Journal of Food Science and Technology*, 2013, 5(2): 160-163.
- [67] Liu M C, Li H F, Xi L J, Yang L S. Effect of Fe, Mn coating formed on roots on Cd uptake by rice varieties. *Acta Ecologica Science*, 2001, 21(4): 598-602.
- [68] Paromita Ghosh, Kashyap A K. Effect of rice cultivars on rate of N-mineralization, nitrification and nitrifier population size in an irrigated rice ecosystem. *Applied Soil Ecology*, 2003, 24(1): 27-41.
- [69] Taylor G T, Cowder A A. Use of the DCB technique for extraction of hydrous iron oxides from roots of wetland plant. *American Journal of Botany*, 1983, 70(8): 1254-1257.
- [70] Liang Y, Zhu Y G, Xia Y, Li Z, Ma Y. Iron plaque enhances phosphorus uptake by rice (*Oryza sativa*) growing under varying phosphorus and iron concentrations. *Annals of Applied Biology*, 2006, 149(3): 305-312.
- [71] Hossain M B, Jahiruddin M, Loeppert R H, Panaullah G M, Islam M R, Duxbury J M. The effects of iron plaque and phosphorus on yield and arsenic accumulation in rice. *Plant and Soil*, 2009, 317(1/2): 167-176.
- [72] Ye Z H, Baker A J M, Wong M H, Willis A J. Copper and nickel uptake, accumulation and tolerance in *Typha latifolia* with and without iron plaque on the root surface. *New Phytologist*, 1997, 136(3): 481-488.
- [73] Christensen K K, Jensen H S, Andersen F Ø, Holmer M, Wigand C. Interferences between root plaque formation and phosphorus availability for isoetids in sediments of oligotrophic lakes. *Biogeochemistry*, 1998, 43(2): 107-128.
- [74] Zhou X B, Shi W M. Effect of root surface iron plaque on se translocation and uptake by Fe-deficient rice. *Pedosphere*, 2007, 17(5): 580-587.
- [75] Zeng X Z, Lv S H, Liu W J, Zhang X K, Zhang F S. Effects of root surface iron and manganese oxide plaque on iron, manganese and phosphorus, zinc nutrition of rice. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2001, 14(4): 34-38.
- [76] Christensen K K, Wigand C. Formation of root plaques and their influence on tissue phosphorus content in *Lobelia dortmanna*. *Aquatic Botany*, 1998, 61(2): 111-122.
- [77] Zhang X K, Zhang F S, Mao D R. Effect of iron plaque outside roots on nutrient uptake by rice (*Oryza sativa* L.): phosphorus uptake. *Plant and Soil*, 1999, 209(2): 187-192.
- [78] Cai M Z, Zhang S N, Xing C H, Wang F M, Zhu L, Wang N, Lin L Y. Interaction between iron plaque and root border cells ameliorates aluminum toxicity of *Oryza sativa* differing in aluminum tolerance. *Plant and Soil*, 2012, 353(1/2): 155-167.
- [79] Liu H J, Zhang J L, Christie P, Zhang F S. Influence of iron fertilization on cadmium uptake by rice seedlings irrigated with cadmium solution. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2010, 41(5): 584-594.
- [80] Liu J G, Leng X M, Wang M X, Zhu Z Q, Dai Q H. Iron plaque formation on roots of different rice cultivars and the relation with lead uptake. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2011, 74(5): 1304-1309.
- [81] Ultra V U, Nakayama A, Tanaka S, Kang Y M, Sakurai K, Lwasaki K. Potential for the alleviation of arsenic toxicity in paddy rice using amorphous iron-(hydr)oxide amendments. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2009, 55(1): 160-169.
- [82] Garnier J M, Travassac F, Lenoble V, Rose J, Zheng Y, Hossain M S, Chowdhury S H, Biswas A K, Ahmed K M, Cheng Z. Temporal variations in arsenic uptake by rice plants in Bangladesh: the role of iron plaque in paddy fields irrigated with groundwater. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(19): 4185-4193.
- [83] Hansel C M, La Force M J, Fendorf S, Sutton S. Spatial and temporal association of As and Fe species on aquatic plant roots. *Environmental Science & Technology*, 2002, 36(9): 1988-1994.
- [84] Chen Z, Zhu Y G, Liu W J, Meharg A A. Direct evidence

- showing the effect of root surface iron plaque on arsenite and arsenate uptake into rice (*Oryza sativa*) roots. *New Phytologist*, 2005, 165(1): 91-97.
- [85] Liu Y J, Zhu Y G, Ding H, Guo W, Chen Z, Liu W J. The effect of root surface iron plaque on Pb uptake by rice (*Oryza Sativa* L.) roots. *Environmental Chemistry*, 2007, 26(3): 327-330.
- [86] Liu M C, Li H F, Xia L J, Yang L S. Differences of cadmium uptake by rice genotypes and relationship between the iron oxide plaque and cadmium uptake. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2000, 20(5): 592-596.
- [87] Liu W J, Zhang X K, Zhang F S. Effects of iron oxides and root exudates on cadmium uptake by rice. *Acta Pedologica Sinica*, 1999, 6(4): 463-469.
- [88] Bacha R E, Hossner L R. Characteristics of coatings formed on rice roots as affected by iron and manganese additions. *Soil Science Society of America*, 1977, 41(5): 931-935.
- [89] Steyr L, Fortin D, Campbell P G C. Microscopic observations of the iron plaque of a submerged aquatic plant (*Vallisneria-Americana* Michx). *Aquatic Botany*, 1993, 46(2): 155-167.
- [90] Batty L C, Baker A J M, Wheeler B D, Curtis C D. The effect of pH and plaque on the uptake of Cu and Mn in *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex. Steudel. *Annals of Botany*, 2000, 86(3): 647-653.
- [91] Crowder A A, Sy-Cyr L. Iron oxide plaques on wetland roots. *Trends in Soil Science*, 1991, 1: 315-329.
- [92] Voegelin A, Weber F A, Kretzschmar R. Distribution and speciation of arsenic around roots in a contaminated riparian floodplain soil: Micro-XRF element mapping and EXAFS spectroscopy. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 2007, 71(23): 5804-5820.
- [93] Sherman D M, Randall S R. Surface complexation of arsenic(V) to iron(III) (hydr) oxides: structural mechanism from ab initio molecular geometries and EXAFS spectroscopy. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, 67(22): 4223-4230.
- [94] Blute N K, Brabander D J, Hemond H F, Sutton S R, Newville M G, Rivers M L. Arsenic sequestration by ferric iron plaque on cattail roots. *Environmental Science & Technology*, 2004, 38(22): 6074-6077.
- 参考文献:
- [13] 依纯真, 李花粉, 张福锁. 水稻根表及其自由空间的铁氧化物对吸收镉的影响. *北京农业大学学报*, 1994, 20(4): 375-379.
- [14] 张西科, 张福锁, 毛达如. 根表铁氧化物胶膜对水稻吸收 Zn 的影响. *应用生态学报*, 1996, 7(3): 262-266.
- [17] 杨婧, 胡莹, 王新军, 陈学萍, 黄益宗, 朱永官. 两种通气组织不同的水稻品种根表铁膜的形成及砷吸收积累的差异. *生态独立学报*, 2009, 4(5): 711-717.
- [22] 刘文菊, 朱永官. 湿地植物根表的铁锰氧化物膜. *生态学报*, 2005, 25(2): 358-363.
- [23] 姚海兴, 叶志鸿. 湿地植物根表铁膜研究进展. *生态学杂志*, 2009, 28(11): 2374-2380.
- [24] 傅友强, 于智卫, 蔡昆争, 沈宏. 水稻根表铁膜形成机制及其生态环境效应. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(6): 1527-1534.
- [25] 傅友强, 梁建平, 于智卫, 吾道铭, 蔡昆争, 沈宏. 不同铁形态对水稻根表铁膜及铁吸收的影响. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(5): 1050-1057.
- [26] 刘婧, 陈昕, 罗安程, 王珊珊, 鞠伟伟. 湿地植物根表铁膜在污水磷去除中的作用. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 2011, 37(2): 224-230.
- [29] 陈学萍, 朱永官, 洪米娜, 王新军, Gault A G, Charnock J M, Polya D A. 不同施肥处理对水稻根表铁和砷形态的影响. *环境化学*, 2008, 27(2): 231-234.
- [45] 王振宇, 刘利华, 温胜芳, 彭昌盛, 邢宝山, 李锋民. 2 种湿地植物根表铁氧化物胶膜的形成及其对磷素吸收的影响. *环境科学*, 2010, 31(3): 781-786.
- [49] 史锬, 张福锁, 刘学军, 张旭东. 不同栽培方式对籼_粳稻根表铁膜和根铁_镉含量的影响. *应用生态学报*, 2003, 14(8): 1273-1277.
- [52] 孟冬梅, 朱永官, 周建国. 水稻根系通气组织与根表铁膜关系的研究. *现代农业科学*, 2008, 15(4): 55-58.
- [54] 刘文菊, 胡莹, 朱永官, 高如泰, 赵全利. 磷饥饿诱导水稻根表铁膜形成机理初探. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(1): 22-27.
- [59] 邓泓, 叶志鸿, 黄铭洪. 湿地植物根系泌氧的特征. *华东师范大学学报: 自然科学版*, 2007, (6): 69-72.
- [62] 张西科, 尹君, 刘文菊, 张福锁, 毛达如. 根系氧化力不同的水稻品种磷锌营养状况的研究. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(1): 54-57.
- [67] 刘敏超, 李花粉, 夏立江, 杨林书. 根表铁锰氧化物胶膜对不同品种水稻吸镉的影响. *生态学报*, 2001, 21(4): 598-602.
- [75] 曾祥忠, 吕世华, 刘文菊, 张西科, 张福锁. 根表铁_锰氧化物胶膜对水稻铁_锰和磷_锌营养的影响. *西南农业学报*, 2001, 14(4): 34-38.
- [85] 刘艳菊, 朱永官, 丁辉, 郭伟, 陈正, 刘文菊. 水稻根表铁膜对水稻根吸收铅的影响. *环境化学*, 2007, 26(3): 327-330.
- [86] 刘敏超, 李花粉, 夏立江, 杨林书. 不同基因型水稻吸镉差异及其与根表铁氧化物胶膜的关系. *环境科学学报*, 2000, 20(5): 592-596.
- [87] 刘文菊, 张希科, 张福锁. 根表铁氧化物和缺铁根分泌物对水稻吸收镉的影响. *土壤学报*, 1999, 6(4): 463-469.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.10 May, 2014 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Landscape sustainability and landscape sustainability science ZHAO Wenwu, FANG Xuening (2453)
- A diagnostic framework of payments for ecosystem services and associated case studies
..... ZHU Wenbo, WANG Yang, LI Shuangcheng (2460)
- Progress in research of iron plaque on root surface of wetland plants
..... LIU Chunying, CHEN Chunli, GONG Xiaofeng, et al (2470)
- Ecological effects of predator chemical cues in aquatic ecosystem QIN Guangqiu, LU Haoliang, TANG Zhenzhu, et al (2481)
- Secondary substances and their ecological effects on seed dispersal in vertebrate-dispersed fleshy fruit plants
..... PAN Yang, LUO Fang, LU Changhu (2490)

Autecology & Fundamentals

- Responses of CH₄ uptake rates to simulated N deposition in a nature forest in mid-subtropical China
..... CHEN Chaoqi, YANG Zhijie, LIU Xiaofei, et al (2498)
- Ecological characteristics of *Phragmites australis* and their relationship to water-salt indicators in dry habitats of the southern
marginal zones of the Tarim Basin, China GONG Lu, ZHU Meiling, TASHPOLAT · Tiyp, et al (2509)
- Threshold effect of soil moisture on photosynthetic and physiological parameters in *Rosa xanthina* L. and its photosynthetic
productivity classification ZHANG Shuyong, XIANG Jiangbao, ZHANG Guangcan, et al (2519)
- Contrasting responses of soil respiration to litter manipulation in subtropical *Mytilaria laosensis* and *Cunninghamia lanceolata*
plantations YU Zaipeng, WAN Xiaohua, HU Zhenhong, et al (2529)
- Potassium application for increased jasmonic acid content and defense enzyme activities of wheat leaves infested by aphids
..... WANG Yi, ZHANG Yueling, SU Janwei, et al (2539)
- Combined effects of elevated O₃ concentration and reduced solar irradiance on photosynthetic activity and energy dissipation
of winter wheat SUN Jian, ZHENG Youfei, et al (2548)
- Colonization dynamics of *Bacillus cereus* B3-7 on wheat roots and control efficiency against sharp eyespot of wheat
..... HUANG Qiubin, ZHANG Ying, LIU Fengying, et al (2559)
- Quantitative study of water consumption characteristics of winter wheat under deficit irrigation
..... ZHANG Xingjuan, XUE Xuzhang, GUO Wenzhong, et al (2567)
- Assessment on the ecological fitness of anti-fungal transgenic rice LI Wei, GUO Jianfu, YUAN Hongxu, et al (2581)
- A proteomic analysis of *Arachis hypogaea* leaf in responses to enhanced ultraviolet-B radiation
..... DU Zhaokui, LI Junmin, ZHONG Zhangcheng, et al (2589)
- Composition of fatty acids from suspended particulate matter in southern South China Sea
..... LIU Huaxue, KE Changliang, LI Chunhou, et al (2599)
- The influence of age, flock size, habitat, and weather on the time budget and the daily rhythm of wintering Siberian Cranes
in Poyang Lake YUAN Fangkai, LI Yankuo, LI Fengshan, et al (2608)
- The energy budget and water metabolism heat regulation of tree sparrows *Passer montanus* of toba compensatory regeneration
..... YANG Zhihong, WU Qingming, YANG Miao, et al (2617)
- The effect of low-dose of pesticide on predation of spider and its preliminary mechanisms LI Rui, LI Na, LIU Jia, et al (2629)
- Response of the alligator weed flea beetle, *Agasicles hygrophila* (Coleoptera: Chrysomelidae) to overwintering protection and
its controlling effect on alligator weed *Alternanthera philoxeroides* (Amaranthaceae: Alternanthera)
..... LIU Yufang, WANG Xiuxiu, LI Fei, et al (2638)

Population, Community and Ecosystem

- The effect of climate change on the population fluctuation of the Siberian crane in Poyang Lake LI Yankuo, QIAN Fawen, SHAN Jihong, et al (2645)
- Characteristics of soil phosphorus fractions in wetlands with various restoration age in caizi lake, Anhui Province LIU Wenjing, ZHANG Pingjiu, DONG Guozheng, et al (2654)
- Multivariate analysis of the relations between phytoplankton assemblages and environmental factors in Chagan Lake Wetland LI Ranran, ZHANG Guangxin, ZHANG Lei (2663)
- Diversity of methanogen communities in tidal freshwater and brackish marsh soil in the Min River estuary ZENG Zhihua, YANG Minhe, SHE Chenxing, et al (2674)
- The influence of environment and phylogenic background on variation in leaf and fine root traits in the Yanhe River catchment, Shaanxi, China ZHENG Ying, WEN Zhongming, SONG Guang, et al (2682)
- Changes of soil properties in re-vegetation stages on sloping-land with purple soils in hengyang of Hunan Province, South-central China YANG Ning, ZOU Dongsheng, YANG Manyuan, et al (2693)
- Vulnerability assessment on the mangrove ecosystems in qinzhou bay under sea level rise LI Shasha, MENG Xianwei, GE Zhenming, et al (2702)
- Dynamics of biomass and productivity of three major plantation types in southern China DU Hu, ZENG Fuping, WANG Kelin, et al (2712)
- Fungal diversity in *Cunninghamia lanceolata* plantation soil HE Yuanhao, ZHOU Guoying, WANG Shenjie, et al (2725)
- Response of sandy vegetation characteristics to precipitation change in Horqin Sandy Land ZHANG Lamei, LIU Xinping, ZHAO Xueyong, et al (2737)
- Characteristics of carbon storage and sequestration of *Robinia pseudoacacia* forest land converted by farmland in the Hilly Loess Plateau Region SHEN Jiapeng, ZHANG Wenhui (2746)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Forest microclimate change along with the succession and response to climate change in south subtropical region LIU Xiaodong, ZHOU Guoyi, CHEN Xiuzhi, et al (2755)
- Drought variations of winter wheat in different growth stages and effects of climate trend in Huang-Huai-Hai Plain, China XU Jianwen, JU Hui, LIU Qin, et al (2765)

Resource and Industrial Ecology

- A method of environment assessment of mineral resources planning for shanxi provinces base on GIS LIU Wei, DU Peijun, LI Yongfeng (2775)
- A new approach to assess the water footprint of hydropower: a case study of the Miyun reservoir in China ZHAO Dandan, LIU Junguo, ZHAO Xu (2787)

《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 祖元刚

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 34 卷 第 10 期 (2014 年 5 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 34 No. 10 (May, 2014)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail: journal@ cspg. net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@ cspg. net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发刊

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元